

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 18 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22700424

研究課題名（和文）線条体の神経活動による価値表現

研究課題名（英文）Value coding of the striatal neurons

研究代表者

南本 敬史（MINAMIMOTO TAKAFUMI）

独立行政法人放射線医学総合研究所・分子イメージング研究センター・チームリーダー

研究者番号：50506813

研究成果の概要（和文）：期待される報酬量と報酬遅延から、主観的価値が計算され行動に反映される。尾状核より単一神経細胞活動を記録し、行動から推定された主観的価値と有意な相関関係を示す神経活動を同定した。一方、報酬獲得にともなう価値減衰に影響を受けなかった。これらの線条体では主観的に価値が表現され、報酬獲得行動の適切な動機づけよりも、価値による適切な行動の学習／選択などに関わることを示唆される。

研究成果の概要（英文）：We studied how caudate neurons code temporal discounted values in an instrumental task. We recorded the 99 phasically active neurons in the caudate nucleus. Sixty-four neurons showed significant cue-related activity. 15 neurons (23%) showed significant linear relation with discounted outcome value (DV). Within 120 trials recording periods, more than 15% of motivational value was discounted as reward accumulation (i.e., devaluation). However, the DV related activity was not sensitive to this reward devaluation. These results suggest that a subset of single caudate neuron represent the discounted outcome value computed from the predicted reward size and delay duration. The caudate discounted value coding is insensitive to devaluation. These value coding appears to be involved in value based decision making rather than motivational regulation of action.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：脳神経科学、神経・筋肉生理学

キーワード：システム神経生理・ニューロインフォマティクス

### 1. 研究開始当初の背景

神経科学領域におけるメインピックの一つである意思決定の神経機構の解明において、①選択肢の価値が脳内のどこで、どのように表現され、②どのように比較されているか？を明らかにすることが必須である。特に①の“価値の脳内表現”については、サルを用いた神経活動記録実験により、数多くの大脳皮質領野や大脳基底核の各部位において特異的な表現をもつことが明らかとなっている。例えば大脳基底核の線条体においては、行動選択の直前に、特定の選択行動に伴う報酬予測（行動価値）に相関を持って活動するニューロンが存在することが報告されている（Samejimaら, 2005）。また、申請者らの研究により、特定の行動と報酬量との組み合わせに特異的なニューロン活動を報告した（Horiら, 2009）。しかし、これら線条体の行動に付随する価値の情報表現について、その価値が、報酬の量などから計算される主観的な価値を表現しているのか、さらに、動物の欲求に伴って変化する動機付けを反映する価値を表現しているかのどちらかであるかが明らかになっていない。これらを明らかにすることは、意思決定の神経機構を明らかにする上で非常に重要であるが、動物の動機付け価値と主観的価値を定量する良い手だてがなかったために、不明なままであった。

### 2. 研究の目的

本研究において、線条体の神経活動が報酬量のような外部情報に基づく主観的価値表現なのか、動機付けなど個体の内部情報に依存する表現をもつのか、そのいずれかを明らかにすることを目的とする。申請者はサルの行動課題を開発し、報酬条件と動物の獲得報酬量から、動機付けと試行ごとの期待報酬（主観的価値）を分離することが可能となった。この課題遂行中のサルの尾状核の投射細胞の活動を記録し、行動データと数理モデルにより推定された①主観的価値②動機付けレベル情報、の2つのパラメータによって神経活動がどの程度説明されるかという観点で解析することにより、神経活動が表現する情報を細胞ごとに明らかにすることで、線条体の価値表現様式を明らかにする。

### 3. 研究の方法

線条体の神経活動の表現を明らかにするために、申請者が開発した行動課題（図1）をサル8頭に訓練して、課題の拒否率が報酬量と遅延の2変数で説明できるか確認する。そのために次の（1）式でフィッティングを行う。

$$E = (1+kD)/aR \quad (1)$$

ここで、拒否率(E)報酬量(R)遅延(D)、 $a$ と $k$ は自由パラメータ。さらに、報酬条件と動物

の欲求の2要因で説明できるかを確認するため、データを次の（2）式でフィッティングすることで確認する。

$$E = (1+kD)/aRF(NCR) \quad (2)$$

ここで、

$$F(NCR) = e^{-\lambda NCR} \quad (3)$$

NCRは標準化した総獲得報酬量で、 $\lambda$ は自由パラメータ。

その後、そのうち2頭については外科手術を行い、頭部固定具と記録チャンバーをインプラントする。インプラントに先立って、記録部位をMRIで確認し、チャンバーの位置を同定する。回復後、行動課題遂行中のサル線条体（尾状核）の投射細胞の活動を記録する。神経活動データは、行動から推定された遅延報酬割引（主観的価値）を独立変数とした回帰分析により、情報表現を明らかにする。主観的価値(DV)は、

$$DV = R/(1+kD) \quad (4)$$

で計算され、ここでR、D、kはそれぞれ、報酬量、報酬遅延、（1）式でえられた最適パラメータである。

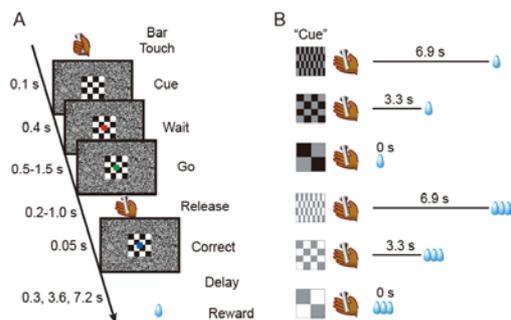


図1. 行動課題 (A)課題の手続き (B)視覚てがかりと報酬条件との関係

### 4. 研究成果

(1)行動解析の結果：これまで報告してきた通り、個体の報酬獲得行動の拒否率は報酬量と遅延による双曲線型割引関数を用いたモデル（1式）でよく説明できた（図2）。

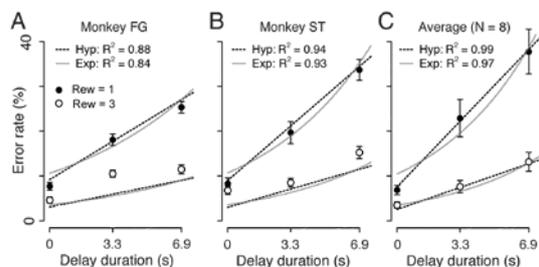


図2報酬量と遅延によるパフォーマンスの影響  
双曲線型遅延割引関数で行動が説明できた（直線）

従って、これら2つの外部変数から計算される遅延割引価値によって、行動が制御されている可能性が示された。さらに、動物の内的状態（喉の渇き）に従って変化する拒否率の変化が指数関数割引と遅延報酬割引を組み合わせることで説明できた。このことは遅延報酬割引と価値減衰の2つのプロセスが独立して働き、行動を制御している可能性が示唆される。

(2) 神経活動解析結果：2頭のサル尾状核より99個の単一神経活動を記録した。これまでの報告におけるPANsという線条体の投射細胞と考えられる活動の特徴と一致した。64個(65%)の尾状核の細胞が手がかり刺激の後活動を有意に増大させた。そのうちの約20%(15個)の活動が、行動から推定された遅延報酬割引と有意に正または負の相関関係を示した(図3AB)。つまりこれら15個の神経活動それぞれが、主観価値をコードしていると考えられる。この神経活動による主観価値の情報の時間経過を調べるため、神経活動を主観価値で直線回帰し、その回帰係数の2乗(寄与率)の平均値を時間ごとに求めた(図3C)。その結果、刺激呈示直後から徐々に上昇し、行動の開始時点まで保持されていることが明らかとなった。

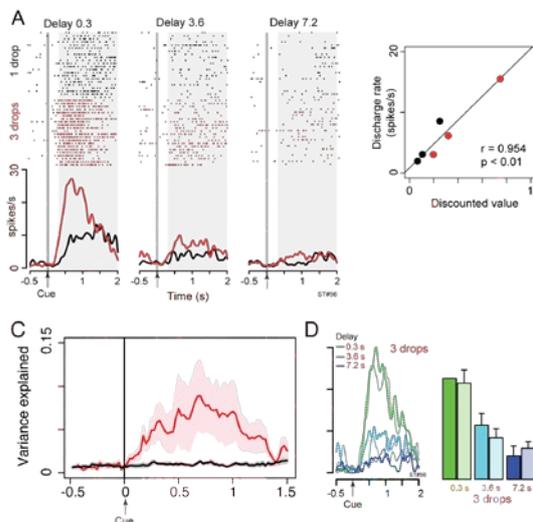


図3 尾状核神経細胞活動による遅延報酬割引価値の表現 (A) 手がかり刺激後の活動が報酬量と遅延から計算される価値に相関を示す一例 (B) (A)の放電頻度と価値の関係。(C) 価値を表現する細胞活動(N=15)が保持する遅延報酬価値情報量の時間的推移 (D) 価値の減衰の影響。

神経活動が報酬と遅延それぞれの変数の情報を別々に保持している可能性を検証するため、これら2つの独立変数による重回帰をおこない、有意に0でない回帰係数を持つ細胞を調べた。単独に、報酬量、遅延の情報をもつ神経細胞は数としても少なく(それぞれN=5)、その寄与率も小さかった(<10%)。一

方、両者の情報を持つ細胞はN=9で、その寄与率が比較的大きかった(>15%)。このことから、尾状核が示す主観価値の情報表現は、報酬量や遅延の情報を個々の神経活動が示すのではなく、数は少ないが、これら2つを統合した遅延報酬割引の情報として保持するという特徴があることが示唆される。

次に、これら主観価値をコードする細胞活動について、報酬価値の減衰の影響を受けるかどうかを評価するため、記録の前半/後半の2群にわけて比較した。行動解析から報酬獲得に伴い、価値が指数関数に従って減少することが分かっており(式2と3)、約120試行の記録時においては15~30%の価値減衰が生じることがモデルから推定された。しかし、これらの活動は、前半後半とも有意な活動の変化を示すことがなく(図4D)、報酬獲得にともなう価値の減衰(devaluation)に影響を受けないことが明らかとなった。

### (3) 考察

尾状核の特定の神経細胞は、報酬の量とタイミングが予測できる刺激が呈示されると、遅延報酬割引による価値の情報を、単一の神経細胞活動で表現することが明らかとなった。その情報は手がかり刺激後から行動をする直前まで保持された。またこの表現は喉の渇きなど内部状態を反映したコーディングでない可能性が高い。これらの線条体での価値コーディングは報酬獲得行動の適切な動機づけより、価値による適切な行動の学習/選択などに関わることが示唆される。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表]

- ① 堀 由紀子、バリー・リッチモンド、南本敬史. 「動機づけ行動において遅延割引による報酬価値を表現する尾状核神経活動」2011年度 包括脳ネットワーク夏のワークショップ 2011/08/23 神戸

[その他]

所属研究室 HP アドレス

[http://www.nirs.go.jp/seika/brain/team/system\\_09.html](http://www.nirs.go.jp/seika/brain/team/system_09.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

南本 敬史 (MINAMIMOTO TAKAFUMI)  
独立行政法人放射線医学総合研究所・  
分子イメージング研究センター・  
チームリーダー  
研究者番号：50506813

### (2) 研究協力者

堀 由紀子 (HORI YUKIKO)

独立行政法人放射線医学総合研究所・  
分子イメージング研究センター・  
博士研究員  
研究者番号：30433246

リッチモンド・バリー (Barry J Richmond)  
米国国立衛生研究所(NIH)・  
NIMH・Laboratory of Neuropsychology  
部門チーフ